



## Study of the submicronic aerosol dry deposition on urban surfaces in a wind tunnel.

Pierre Roupsard, Muriel Amielh, Alexis Coppalle, Hubert Branger, P. Laguionie, Olivier Connan, D. Hébert, Didier Maro, M. Talbaut

### ► To cite this version:

Pierre Roupsard, Muriel Amielh, Alexis Coppalle, Hubert Branger, P. Laguionie, et al.. Study of the submicronic aerosol dry deposition on urban surfaces in a wind tunnel.. 26ème Congrès Français sur les aerosols, Jan 2011, Paris, France. pp.1-6. hal-00760194

**HAL Id: hal-00760194**

**<https://hal.science/hal-00760194>**

Submitted on 3 Dec 2012

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# **ETUDE DU DEPOT SEC D'AEROSOLS SUBMICRONIQUES SUR DES SURFACES URBAINES EN VEINE AERAILIQUE.**

P. Roupsard<sup>(1)</sup>, M. Amielh<sup>(2)</sup>, A. Coppalle<sup>(3)</sup>, H. Branger<sup>(2)</sup>, P. Laguionie<sup>(1)</sup>, O. Connan<sup>(1)</sup>, D. Hébert<sup>(1)</sup>, D. Maro<sup>(1)</sup> et M. Talbaut<sup>(3)</sup>

(1) Laboratoire de Radioécologie de Cherbourg-Octeville (LRC), Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, 50130 Cherbourg-Octeville, France.

(2) Institut de Recherche sur les Phénomènes Hors Equilibre (IRPHE), UMR-6594, 13384 Marseille, France.

(3) Complexe de Recherche Interprofessionnel en Aérothermochimie (CORIA), UMR-6614, 76801 Saint-Etienne du Rouvray, France.

\*pierre.roupsard@irsn.fr

TITLE:

## **STUDY OF THE SUBMICRONIC AEROSOL DRY DEPOSITION ON URBAN SURFACES IN A WIND TUNNEL.**

ABSTRACT:

To quantify the impact of an accidental or chronic pollution by an aerosol on an urban environment, dry deposition transfer coefficient, or dry deposition velocity, must be determined for the different surfaces composing this environment (roofs, walls and ground) as a function of the micrometeorological conditions. There are few data for the urban environment. Data have been acquired in laboratory but they are poorly representative of urban environments. Moreover field measurements are not related to micrometeorological parameters that are very important in the deposition phenomenon.

In this study, the dry deposition velocities of a tracer aerosol, representative of the coagulation mode of the atmospheric aerosol, on three urban surfaces and for three wind speed were quantified experimentally in a wind tunnel. A significant increase of the deposition velocities with the roughness of the surfaces and the flow speed was observed. These dry deposition velocity measurements were achieved together with turbulence measurements.

RESUME :

Pour quantifier l'impact d'une pollution accidentelle ou chronique par un aérosol porteur de polluants sur un environnement urbain, des coefficients de transfert de dépôt sec de l'aérosol, ou vitesses de dépôt sec, doivent être déterminés pour les différentes surfaces composant le milieu urbain (toits, murs et sols) en fonction des conditions micrométéorologiques. Il existe peu de données établies pour ce milieu. Des données ont été acquises en laboratoire, mais pour des surfaces représentatives d'espaces confinés et non du milieu urbain. De plus, les données acquises *in situ* ne sont pas reliées aux paramètres micrométéorologiques pourtant cruciaux dans le phénomène de dépôt.

Cette étude a permis de quantifier expérimentalement en veine aéraulique les vitesses de dépôt sec d'un aérosol traceur, représentatif du mode coagulation de l'aérosol atmosphérique, sur trois surfaces du milieu urbain et pour trois vitesses d'écoulement de l'air. Elle montre une augmentation significative des vitesses de dépôt sec avec la rugosité des surfaces et la vitesse d'écoulement de l'air. Ces mesures de vitesses de dépôt sec ont été complétées par des mesures anémométriques de turbulence.

## CONTEXTE ET OBJECTIFS.

Dans le cas d'un rejet de polluant atmosphérique, accidentel ou chronique, sur un environnement urbain, la contribution des aérosols au transfert de cette pollution doit être prise en compte. Ainsi, un coefficient de transfert de dépôt de l'aérosol doit être déterminé pour calculer les transferts de polluants du compartiment atmosphérique vers différents types de surfaces urbaines (toits, murs et sols) dans un contexte de prédiction opérationnelle. Selon les conditions météorologiques, il peut s'agir de dépôt humide (dans le cas de précipitations) ou de dépôt sec en conditions sèches.

Le transfert par dépôt sec peut être quantifié par la vitesse de dépôt sec, rapport du flux surfacique de dépôt des particules sur la concentration de ces particules à proximité de la surface. Cette vitesse de dépôt dépend notamment des conditions de turbulence atmosphérique, de la granulométrie de l'aérosol ou encore de la nature de la surface du dépôt. Le dépôt sec a surtout été étudié en environnement naturel et en milieu confiné. Actuellement, il existe peu de données établies pour des vitesses de dépôt sec en milieu urbain (Fowler *et al.*, 2009). De plus, soit ces données ont été établies en laboratoire pour des surfaces représentatives des milieux confinés (Nerisson, 2009), soit elles ont été établies *in situ* mais ne sont alors pas reliées à des conditions micrométéorologiques ou à la granulométrie de l'aérosol (Roed, 1987 ; Pesava, 1999).

Cette étude s'inscrit dans un travail de quantification du dépôt sec en milieu urbain et constitue une première étape. Des expérimentations ont été menées en veine aéraulique en générant un aérosol traceur submicronique afin de mesurer des vitesses de dépôt sec sur trois surfaces représentatives du milieu urbain et pour trois vitesses moyennes d'écoulement de l'air. Des mesures anémométriques aux fils chauds ont aussi été réalisées pour quantifier la turbulence au-dessus des surfaces étudiées et documenter les vitesses de dépôt sec mesurées avec des vitesses de friction.

## MATERIEL ET METHODE.

La vitesse de dépôt sec  $V_d$  (en  $\text{m.s}^{-1}$ ) d'un aérosol est définie par Chamberlain et Chadwick (1953, dans Sehmel 1980) comme étant le rapport entre l'opposé du flux de dépôt sec  $F$  (en  $\text{particules.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) d'un aérosol et la concentration dans l'air  $C$  (en  $\text{particules.m}^{-3}$ ) de cet aérosol à proximité de la surface. Elle est calculée selon l'équation 1 et est utilisée comme coefficient de transfert d'un aérosol de l'air à la surface.

$$V_d = \frac{-F}{C} \quad \text{Équation.1}$$

Le flux de dépôt sec  $F$  est la quantité de particules déposées par unité de surface et de temps. La vitesse de dépôt sec  $V_d$  est obtenue en divisant le flux de dépôt par la concentration  $C$  de l'aérosol mesurée dans l'air à proximité de la surface. Par convention, un flux dirigé vers le substrat est considéré comme négatif.

La vitesse de friction  $U_*$  (en  $\text{m.s}^{-1}$ ) est déterminée à partir de la loi logarithmique (équation 2) calée sur le profil vertical de vitesses mesurées de l'écoulement d'air. Elle quantifie la turbulence mécanique générée par le frottement d'un écoulement sur une surface.

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{Équation.2}$$

$U$  (en  $\text{m.s}^{-1}$ ) est la vitesse de l'écoulement mesurée en  $z$  (en m), avec  $z=0$  m à la surface du substrat étudié,  $z_0$  est la longueur de rugosité et  $\kappa$  est la constante de Von Karman, égale à 0,41.

Les expérimentations se sont déroulées en avril 2010 dans la soufflerie de l'IRPHE à Luminy (13). Cette soufflerie fonctionne en circuit fermé avec une veine d'air de 8,65 m de long de section rectangulaire (0,64 m de large et 0,28 m de haut). Le fond de la veine aéraulique a été successivement et entièrement recouvert d'enduit de façade, de verre lisse et d'herbe synthétique afin d'y développer les couches limites et la turbulence caractéristiques à chaque type de surface (figure 1). Les vitesses d'écoulement d'air  $U_e$  générées étaient de 1,3 , 5,0 et 9,9  $\text{m.s}^{-1}$ . Les flux de dépôt sec  $F$  de l'aérosol introduit dans la veine sont mesurés à l'aide d'éprouvettes : des plaques carrées de 0,20 m de côté constituées des matériaux étudiés. Trois éprouvettes étaient disposées transversalement dans la veine, avec des bords d'attaque à 1, 5 et 6,8 m de l'entrée de la veine (fetch) pour étudier l'effet du développement de la couche limite, donc de la turbulence, sur le phénomène de dépôt. Les bords de ces éprouvettes affleuraient les surfaces des substrats recouvrant le fond de la veine aéraulique. La concentration en aérosols  $C$  a été mesurée par prélèvement sur des filtres en cellulose de 47 mm de diamètre. Les prélèvements ont été réalisés en quatre points. Trois sont situés juste en aval de chaque rangée d'éprouvettes (fetchs de 1,2 , 5,2 et 7,0 m) à 10 mm au

dessus du substrat pour ne pas perturber l'écoulement au dessus des éprouvettes et donc le dépôt sec. Le quatrième est au centre de la section de la veine à un fetch de 5,2 m, pour s'assurer de l'homogénéité de la concentration en aérosols dans celle-ci.

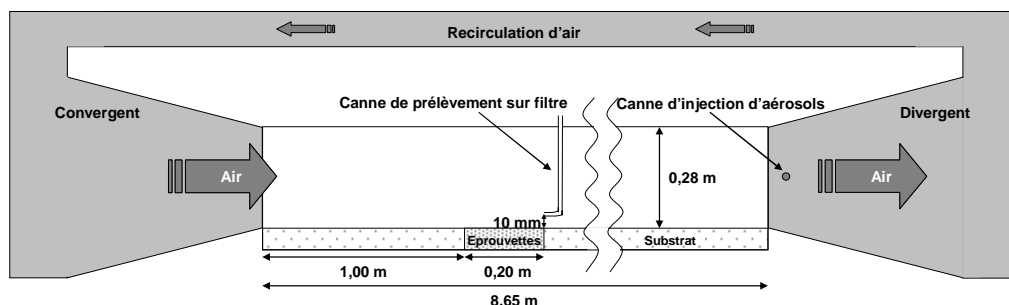


Figure 1: Schéma du montage expérimental dans la veine.

L'aérosol traceur généré pour cette étude est un aérosol de fluorescéine monomodal, polydispersé, représentatif du mode coagulation de l'aérosol atmosphérique. Le générateur d'aérosols utilisé est un générateur pneumatique dont le fonctionnement est décrit par Laurent (1997). Une solution de fluorescéine sodée à 8 % a été utilisée pour générer un aérosol de diamètre aérodynamique moyen massique de  $0,45 \mu\text{m}$ , associé à un écart-type relatif moyen de 1,26, qui a été mesuré par prélèvement avec un Low Pressure Impactor. L'aérosol était injecté dans la veine à l'aide d'une canne d'injection multipoints traversant le divergent horizontalement en son centre.

Les quantités d'aérosols déposés sur les éprouvettes et prélevés sur les filtres et les plateaux d'impaction sont déterminées par mise en solutions de la fluorescéine dans de l'eau déminéralisée ammoniacuée à  $\text{pH} = 9$  et mesure de ces solutions avec un spectrofluorimètre (modèle Fluoromax-3 de Jobin Yvon HORIBA).

Les mesures de turbulence ont été réalisées avec une sonde à fils chauds en X associée à un système anémométrique Streamline (DANTEC Dynamics) à des fréquences d'acquisition de 2,5 kHz à  $U_e = 1,3 \text{ m.s}^{-1}$  et 10 kHz à  $U_e = 5,0$  et  $9,9 \text{ m.s}^{-1}$ . Les profils de vitesse ont été mesurés sur un axe normal aux éprouvettes centrales à 1,1, 5,1 et 6,9 m.

## RESULTATS ET DISCUSSIONS.

### Mesure des vitesses de dépôt sec.

Les mesures de concentration montrent une homogénéisation de l'aérosol dans la veine ( $3,7.10^{-8} \pm 2,5.10^{-8}$ ,  $4,2.10^{-8} \pm 2,8.10^{-8}$  et  $4,0.10^{-8} \pm 2,7.10^{-8} \text{ kg.m}^{-3}$  à  $z = 10 \text{ mm}$  pour des fetchs respectivement de 1,2, 5,2 et 7,0 m, et  $4,0.10^{-8} \pm 2,8.10^{-8} \text{ kg.m}^{-3}$  à 5,2 m au centre de la section d'écoulement) et donc une absence de gradient de concentration durant les expérimentations grâce à la recirculation d'air. Les vitesses de dépôt ont néanmoins été calculées à partir des concentrations mesurées au niveau des rangées d'éprouvettes. Elles augmentent avec la vitesse moyenne d'écoulement de l'air et la rugosité de la surface :  $V_d$  varie de  $1,2.10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$  pour le verre avec  $U_e = 1,3 \text{ m.s}^{-1}$ , à  $1,4.10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$  pour l'herbe synthétique à  $U_e = 9,9 \text{ m.s}^{-1}$ . Il existe donc un facteur supérieur à 100 entre les plus faibles et plus fortes valeurs mesurées.

Tableau 1. Vitesses de dépôt sec moyennes en fonction de la vitesse moyenne d'écoulement d'air

Vitesse moyenne d'écoulement d'air $U_e (\text{m.s}^{-1})$	Vitesses de dépôt sec moyennes $V_d (10^{-5} \text{ m.s}^{-1})$		
	Verre	Enduit de façade	Herbe synthétique
1,3	$1,4 \pm 0,4$	$2,2 \pm 0,9$	$28 \pm 8$
5,0	$2,3 \pm 1,3$	$4,8 \pm 1,8$	$55 \pm 19$
9,9	$4,5 \pm 2,0$	$7,2 \pm 1,6$	$120 \pm 30$

Des vitesses de dépôt sec moyennes ont ainsi pu être calculées pour chaque type de substrat et vitesse d'écoulement considérés dans cette étude et sont présentées dans le tableau 1 et la figure 2. Les rapports des  $Vd$  moyennes  $Vd_{\text{Enduit}}/Vd_{\text{Verre}}$  et  $Vd_{\text{Herbe}}/Vd_{\text{Verre}}$  sont respectivement de 1,7 et 23,7 et  $Vd_{5\text{m.s}^{-1}}/Vd_{1\text{m.s}^{-1}}$  et  $Vd_{5\text{m.s}^{-1}}/Vd_{1\text{m.s}^{-1}}$  de 1,9 et 3,6. Ces résultats montrent que la rugosité de la surface joue un rôle plus important que la vitesse de l'air sur l'augmentation des  $Vd$ . Ceci est surtout vrai lorsque les vitesses de dépôt de l'herbe synthétique sont comparées à celles du verre, et dans une moindre mesure dans le cas de l'enduit et du verre. Pour chaque type de surface, une paramétrisation de  $Vd$  en fonction de la vitesse moyenne d'écoulement  $Ue$  a été réalisée. Une loi exponentielle a été utilisée selon l'équation 3.

$$Vd = a \cdot \exp(bUe) \quad \text{Équation.3}$$

Les résultats de la paramétrisation sont présentés sur la figure 2. La variable  $a$  est respectivement égale à  $1,2 \cdot 10^{-5}$ ,  $2,0 \cdot 10^{-5}$  et  $2,3 \cdot 10^{-4}$   $\text{m.s}^{-1}$  et la variable  $b$  à  $1,3 \cdot 10^{-1}$ ,  $1,4 \cdot 10^{-1}$  et  $1,7 \cdot 10^{-1}$   $\text{s.m}^{-1}$  pour le verre, l'enduit de façade et l'herbe synthétique.

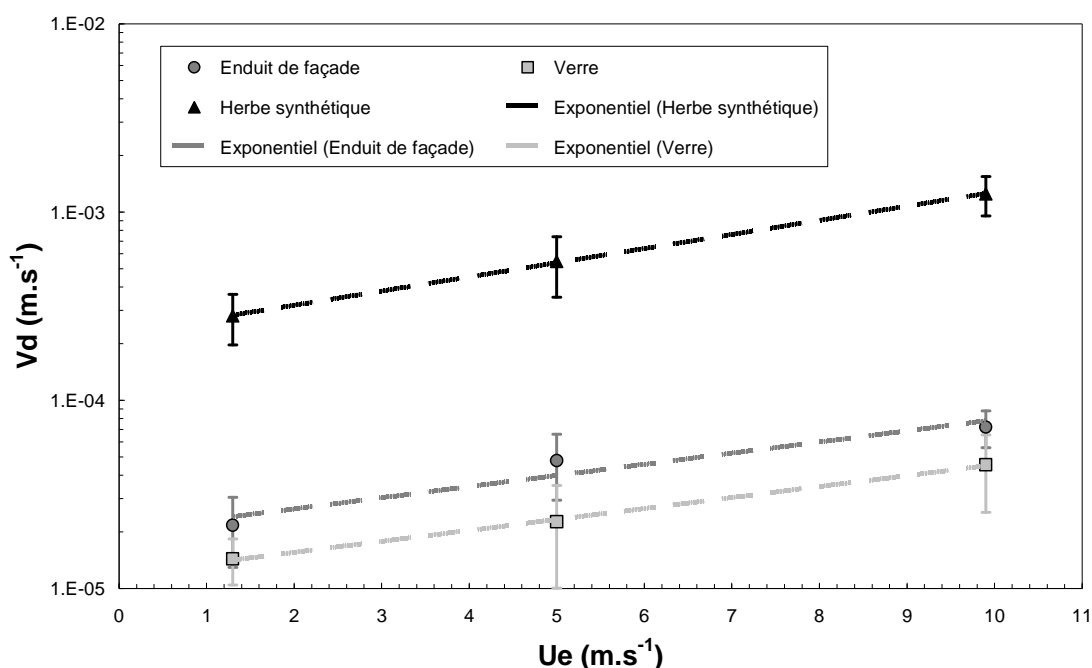


Figure 2. Vitesses de dépôt sec  $Vd$  en fonction des vitesses moyennes d'écoulements  $Ue$ .

#### Estimation des vitesses de friction.

Des profils de vitesse de l'écoulement d'air ont été réalisés au dessus des trois rangées d'éprouvettes (figure 3). Les couches limites développées présentent les caractéristiques de couches limites de plaques planes avec des régimes turbulents établis dès la première rangée d'éprouvettes à 1,1 m de l'entrée de la veine aéraulique.

Tableau 2. Vitesses de friction à 5,10 m en fonction de la vitesse d'écoulement dans la veine

Vitesse moyenne d'écoulement d'air $Ue$ (m.s <sup>-1</sup> )	Vitesses de friction $U_{\tau}$ (m.s <sup>-1</sup> )		
	Verre	Enduit de façade	Herbe synthétique
1,3	0,06	0,06	0,16
5,0	0,23	0,29	0,56
9,9	0,46	0,51	1,06

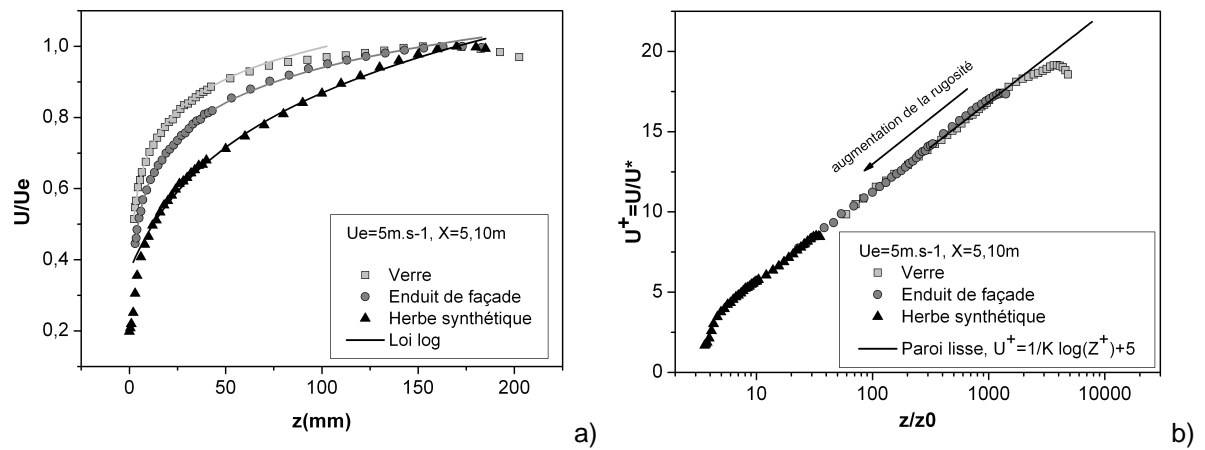


Figure 3. Profils de vitesse dans la couche limite au-dessus des différentes surfaces a) profils normalisés par la vitesse extérieure  $U_e$  ; b) profils normalisés par les variables de paroi  $U^*$  et  $z_0$ .

Des vitesses de frictions  $U^*$  ont été calculées en utilisant la loi logarithmique (équation 2) ajustée sur les profils de vitesse de la couche limite. Elles ont des valeurs comprises entre  $0,06 \text{ m.s}^{-1}$  et  $0,73 \text{ m.s}^{-1}$ . Les  $U^*$  calculées pour un fetch de 5,10 m sont consignées dans le tableau 2.

#### Analyse des vitesses de dépôt sec en fonction des vitesses de friction.

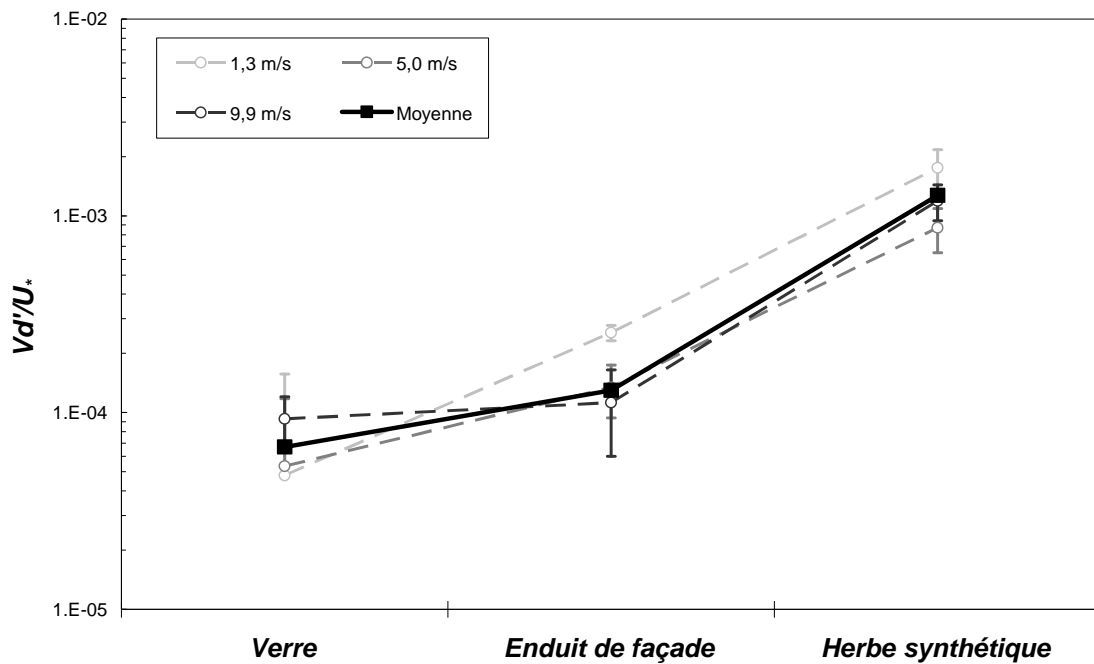


Figure 4. Rapports  $V_d/U^*$  moyens pour chaque type de surface

Les vitesses de dépôt sec sont généralement rapportées au paramètre turbulent en présentant les rapports  $V_d/U^*$ . Afin de relier  $V_d$  à un paramètre dynamique, la vitesse de sédimentation théorique de l'aérosol  $V_s$  (en  $\text{m.s}^{-1}$ ) a été soustraite à la vitesse de dépôt mesurée. La vitesse de sédimentation pour un aérosol de diamètre de  $0,45 \mu\text{m}$ , calculée selon l'équation 4, est égale à  $8,9 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$ .

$$V_s = \frac{d_p^2 g C_u \rho}{18 \nu} \quad \text{Équation.4}$$

$C_u$  est le facteur correctif de Cunningham,  $g$  est l'accélération de pesanteur ( $9,81 \text{ m.s}^{-2}$ ),  $\rho$  est la masse volumique des particules ( $1500 \text{ kg.m}^{-3}$  pour la fluorescéine)  $d_p$  est le diamètre de l'aérosol et  $\nu$  est la viscosité cinématique de l'air ( $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ ).

La figure 4 présente les rapports  $Vd'/U_*$  moyens calculés ( $Vd' = Vd - Vs$ ) pour chaque type de surface et pour chaque vitesse d'écoulement, et les  $Vd'/U_*$  moyens pour chaque type de surface. Ces derniers sont de  $6,7.10^{-5} \pm 4,1.10^{-5}$  pour le verre, de  $1,3.10^{-4} \pm 6.10^{-5}$  pour l'enduit de façade et de  $1,3.10^{-3} \pm 3.10^{-4}$  pour l'herbe synthétique. Les rapports mesurés dans cette étude sont dépendants du type de surface et celui de l'herbe synthétique est du même ordre que ceux mesurés par Damay (2010), qui sont de  $2.10^{-3}$  dans l'environnement naturel mais pour tous les types de couverts étudiés.

## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.

Cette étude en veine aéraulique a été réalisée afin d'établir des vitesses de dépôt sec d'un aérosol submicronique représentatif du mode coagulation de l'aérosol atmosphérique en milieu urbain. Ce travail a permis d'une part la mesure de vitesses de dépôt sur trois surfaces urbaines différentes et pour trois vitesses d'écoulement de l'air, et d'autre part la paramétrisation de  $Vd$  en fonction de  $U_e$ . Des vitesses de friction ont été mesurées pour les relier aux paramètres turbulents de l'écoulement. L'importance de la vitesse moyenne d'écoulement, mais surtout de la rugosité de la surface sur l'évolution de la vitesse de dépôt sec ont été quantifiées. Il a été récemment montré que le rapport  $Vd/U_*$  dans un environnement naturel est environ égal à  $2.10^{-3}$  (Damay, 2010) pour des conditions neutres et stables. Cet ordre de grandeur a été retrouvé pour l'herbe synthétique. Dans le cas du verre et de l'enduit de façade, ce rapport est plus faible.

Cette étude du dépôt sec d'aérosols sur des surfaces horizontales s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche sur le dépôt d'aérosols en milieu urbain. Ce milieu est non seulement composé de surfaces horizontales, mais également d'une grande superficie de surfaces verticales. De plus, les paramètres physiques à prendre en compte sont plus nombreux ; par exemple le rayonnement solaire qui augmente la température des surfaces urbaines. Cette étude sera donc complétée par de nouvelles expérimentations en soufflerie sur le dépôt sec d'aérosols sur paroi verticale et sur l'effet de thermophorèse d'une paroi chauffée sur la vitesse de dépôt sec. Enfin, une étude du dépôt sec *in situ* sera menée afin d'établir des vitesses de dépôt sec en milieu urbain.

## REFERENCES.

- J. Cousteix, Aérodynamique : Turbulence et Couche Limite, Cépaduès-Edition, 1989.
- W. Dai, C. I. Davidson, V. Etyemezian, M. Zufall, Wind tunnel studies of particles transport and deposition in turbulent boundary flows, *Aerosol Science and Technology* 35 (2001) 887-898.
- P.E. Damay, Détermination expérimentale de la vitesse de dépôt sec des aérosols submicroniques en milieu naturel : influence de la granulométrie, des paramètres micrométéorologiques et du couvert, Thèse de doctorat de l'INSA de Rouen, 2010.
- D. Fowler, K. Pilegaard, M.A. Sutton, P. Ambus, M. Raivonen, J. Duyzer, D. Simpson, H. Fagerli, S. Fuzzi, J.K. Schjoerring, C. Granier, A. Neftel, I.S.A. Isaksen, P. Laj, M. Maione, P.S. Monks, J. Bukhardt, U. Daemmgen, J. Neirynck, E. Personne, R. Wichink-Kruit, K. Butterbach-Bahl, C. Flechard, J.P. Tuovinen, M. Coyle, G. Gerosa, B. Loubet, N. Altimir, L. Gruenhage, C. Ammann, S. Cieslik, E. Paoletti, T.N. Mikkelsen, H. Ro-Poulsen, P. Cellier, J.N. Cape, L. Horváth, F. Loreto, Ü. Niinemets, P.I. Palmer, J. Rinne, P. Misztal, E. Nemitz, D. Nilsson, S. Pryor, M.W. Gallagher, T. Vesala, U. Skiba, N. Brüggemann, S. Zechmeister-Boltenstern, J. Williams, C. O'Dowd, M.C. Facchini, G. de Leeuw, A. Flossman, N. Chaumerliac, J.W. Erisman, Atmospheric composition change: Ecosystems-Atmosphere interactions, *Atmospheric Environment* 43 (2009) 5193-5267.
- C. Laurent, Technique de mesure de l'efficacité des filtres T.H.E. au moyen d'un aérosol de fluorescéine sodée, Rapport IPSN DPRE-OAR/THE/GUI-02, 1997.
- D. Maro, O. Connan, D. Hébert, M. Rozet, M. Talbaut, A. Coppalle, J.F. Sini, J.M. Rosant, P. Mestayer, C. Sacré, J.P. Flori, D. Giraud, F. Olive, B. Ruot, P. Rousard, Quantification of the dry deposition of aerosols in an urban environment: towards a new methodology, *International Aerosol Conference*, Helsinki, 29 août – 3 septembre 2010.
- P. Nerisson, Modélisation du transfert des aérosols dans un local ventilé, Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse, 2009.
- P. Pesava, R. Aksu, S. Toprak, H. Horvath, S. Seidl, Dry deposition of particles to building surfaces and soiling, *the Science of the Total Environment* 235 (1999) 25-35.
- A. Renoux, D. Boulaud, Les Aérosols. Physique et Métrologie, Lavoisier Tec & Doc, 1998.
- J. Roed, Dry deposition in rural and in urban areas in Denmark, *Radiation Protection Dosimetry* 21 (1987) 33-36.
- G.A. Sehmel, Particle and gaz dry deposition: a review, *Atmospheric Environment* 14 (1980) 983-1011.